

**С. А. НАЗАРЕНКО**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., НТУ «ХПИ»

## **НЕКОТОРЫЕ ЗАДАЧИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО НАГРУЖЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ**

Рассмотрены общие подходы и особенности задач динамического деформирования и разрушения конструкций, технологий высокоскоростной обработки. Представлены математические модели и методы численных исследований скоростного нагружения элементов конструкций и технологических систем. Рассмотрены перспективы дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** высокоскоростное деформирование, физико-механические свойства конструкционных материалов, пластические деформации, оптимизация, импульсные нагрузки.

**Задачи динамического деформирования и разрушения конструкций.** При создании новой техники в авиационно-космической, энергетической, транспортной, химической, атомной и других отраслях промышленности учитываются вероятные чрезвычайные ситуации, сопровождающиеся интенсивными воздействиями высокоскоростного (более  $10^3 \text{ с}^{-1}$ ) характера на конструкции, разрушением их элементов и т. д. Если уровень поврежденности превысил при анализе критическую величину, необходимо определить место и характер разрушения, конфигурацию зон разрушения, а в задачах дробления – найти форму осколков, их скорости и распределение по массе [1-4].

Большое разнообразие используемых подходов к задачам динамического деформирования и разрушения конструкций обуславливается широким диапазоном изменения интенсивности нагрузок различной природы (взрыв, ударное контактное взаимодействие, действие импульсных электромагнитных или радиационных полей и т.п.). Численный метод, применяемый для расчета фрагментации, должен учитывать распределение начальных неоднородностей по объему тела и локальные особенности полевых функций напряженных и деформированных состояний; описывать кинетику накопления повреждений в процессе деформирования; возникновение, увеличение и слияние трещин и т.д. [1-4].

**Высокоскоростное и ударное нагружение является основным функциональным режимом** для огромного множества машин, приборов, установок самого различного назначения. К современным технологиям высокоскоростной обработки, обеспечивающим многократное повышение производственных мощностей, относят обработку металлов резанием; химико-термическую обработку в условиях низкочастотных акустических воздействий; лазерную и гидроабразивную резку заготовок; химико-термическую обработку в условиях энергетической поляризации, ультразвукового и электри-

© С. А. Назаренко, 2013

ческих полей; химико-термическую обработку отливок в жидкофазовом состоянии и т. д. [5, 6]. Так при проектировании предложены 2D-и 3D-имитационные модели процесса резания, которые предусматривают определение границ отделения стружки от заготовки, формы стружки, границ контакта на поверхностях лезвия и других показателей рабочего процесса на основе фундаментальных критериев и законов теории пластичности с применением метода конечных элементов (МКЭ) и учитывают экспериментально определенные из стандартных испытаний модели материалов определяющие уравнения, теплофизические константы и трибологические свойства заготовки и инструмента [7, 8].

Технологические системы импульсной обработки обладают по сравнению с традиционными методами рядом достоинств (упрощенная оснастка и подготовка производства; высокая точность деталей; малые габариты установок; обработка труднодеформируемых материалов и т.д.) [9, 10]. На базе математической модели, учитывающей пространственно-временные поля различной природы (электрические, магнитные, механические и тепловые) с использованием оптимизационных генетических алгоритмов и метода деформируемого многогранника, был разработан электромеханический преобразователь ударного действия, работающий в импульсном режиме и характеризующийся приемлемыми массогабаритными параметрами и повышенной эффективностью работы [11, 12]. Активно развивается также ряд технологических процессов высокоскоростной обработки металлов давлением (взрывная штамповка, непрерывная и бесконечная прокатка и т. д.).

**Основными свойствами задач высокоскоростного нагружения** являются физическая и геометрическая нелинейность процессов деформирования, маленький размер локализованных областей контактного взаимодействия или зон протекания процессов относительно размеров конструкций; волновой характер реакции материалов деформируемых сред, большое тепловыделение, изменение состояния материалов, объемный характер и быстротечность изучаемых явлений, измеряемая микро- и миллисекундами, и т. д. [1-4, 7-18].

Нелинейность процессов нестационарного деформирования сложных составных конструкций, необходимость создания достоверной цифровой модели прототипов неоднородных анизотропных материалов, внутренняя логика интеграции различных научных теорий обуславливают потребность в комплексном моделировании высокоскоростного нагружения, создании новых и совершенствовании существующих методик расчета конструкций и технологических процессов.

**Математическая модель высокоскоростного нагружения и разрушения элементов конструкций** должна комплексно учитывать трехмерное нестационарное упругопластическое деформирование, физико-механические свойства современных конструкционных материалов, взаимную связь ло-

кальных пластических деформаций с повышением температуры и геометрическую нелинейность.

**Исследования задач высокоскоростного нагружения** конструкций и технологических процессов требуют как применения математического аппарата высокого уровня, так и проведения сложных экспериментальных исследований все более «тонких» динамических свойств современных конструкционных материалов, изменяющихся в зависимости от температуры, интенсивности и скорости деформации во времени и в пространстве. Важные результаты были получены в работах, проведенных в ИПП, ИЭС, ИСТМ, ИМех и ИПМаш НАН Украины, ХПИ, КПИ, ИМаш АН России, МГТУ и других отечественных и зарубежных научно-исследовательских центрах. При этом чаще всего рассматриваются модельные объекты (балки, пластинки, оболочки), а не реальные конструкции машин и приборов с характерной для практических задач проектирования сложностью моделей [13].

Результаты систематических исследований процессов высокоскоростной деформации различных материалов представлены в трудах К. Альбертини, А. Брагова, Р. Грея, Я. Клепачко, А. Новикова, В. Пруда, Д. Филда и др. Для широкого класса неупругих сред основные определяющие соотношения были получены на основе общих термодинамических соотношений и феноменологических постулатов типа гипотез о максимальности пластической работы, постулата Драккера, принципа наименьшей необратимой силы и т. п.

Математическому моделированию и экспериментальному исследованию высокоскоростных технологических процессов и ударному взаимодействию деформируемых тел с другими телами и средами посвящено значительное число работ, включая обширные монографии [1, 2, 13, 15], труды конференций (EURODYMAT, ICHSF, International Symposium on Impact Engineering и др. [11, 14, 21]) и т.п., которые обобщаются множеством обзоров [15-17]. Для описания соотношений между параметрами напряженного и деформированного состояний в динамике на этапе нагружения были предложены различные зависимости (Соколовского - Малверна, Кристеску и др.). Определяющие соотношения Джонсона - Кука (*Johnson - Cook*), Зерилли - Армстронга (*Zerilli - Armstrong*), Оксли (*Oxley*), Купера - Саймондса (*Cowper - Symonds*) позволяют моделировать пластическое поведение материалов в широком диапазоне скоростей деформаций. Идентификации и верификации определяющих соотношений посвящены работы А. Гавруса, Г. Джонсона, М. Мейерса, Дж. Роха, В. Рула, Г. Тейлора, В. Янга и др. Экспериментальные исследования показали, что протекающие при термопластическом деформировании металлических конструкций процессы являются адиабатическими, а температурные деформации значимо влияют лишь в месте больших пластических [18]. Параметр, определяющий часть работы деформации, переходящей в тепловую энергию, зависит от текущей скорости деформации [14].

В недостаточной мере исследованы в трехмерной постановке проблемы, связанные с нахождением участков проскальзывания и сцепления в контакт-

ных задачах с трением. Например, условия фрикционного взаимодействия принимаются в форме закона Кулона с варьируемым коэффициентом трения. При этом компоненты поверхностных нормальных и касательных контактных напряжений связаны известными соотношениями, отображающими «скольжение» контактирующих участков конструкций [19].

Увеличение производительности компьютеров, повышение эффективности вычислений (за счет сетевых Internet-технологий, многопроцессорности и параллелизации) способствовало интеграции соответствующих вычислительных технологий для так называемой симуляции и инженерного анализа моделирования реалистичных виртуальных испытаний высокоскоростного нагружения конструкций и технологических процессов (Simulation & Analysis – S&A).

Для анализа задач высокоскоростного нагружения элементов конструкций используются различные **программные системы и комплексы**, наиболее известными среди которых являются ABAQUS, ANSYS, LS-DYNA, NASTRAN, CATIA, PRO/ENGINEER AVTODYN и ряд других. Большинство программных комплексов базируется на методе конечных элементов (МКЭ), как мировом стандарте для расчета различных прочностных, динамических и других характеристик конструкций [20, 21].

Достоверность полученных результатов обеспечивается выбором при анализе адекватной расчетной сетки, обеспечивающей сходимость решения, контроль в процессе численного счета. Многие из программных комплексов позволяют в одной модели поддерживать несколько формулировок: Лагранжеву, Эйлерову и SPH. Достоинством Эйлеровых схем является возможность вести расчеты процессов с большими деформациями, плюс Лагранжева подхода состоит в относительной простоте реализации условий на свободных и контактных границах. Стремление соединить достоинства обоих подходов привело к созданию гибридных методов, которые применяются для решения задач взаимодействия тел.

Одной из важнейших составляющих частей программных комплексов, определяющих достоверность проводимых расчетов, являются применяемые в них определяющие соотношения (математические модели поведения) и критерии разрушения. Наибольшее приложение получили такие направления теории пластичности, как деформационные теории и теории течения. В вычислительных комплексах широко применяют теории течения с изотропным упрочнением, где в качестве условия текучести используется поверхность Мизеса.

**Перспективы дальнейших исследований.** Анализ научно-технической документации показал, что недостаточно исследованы возможности применения методов анализа чувствительности сложных конечноэлементных моделей и современных методов оптимизации при проектировании конструкций, подвергающихся высокоскоростному нагружению, и выборе рациональных параметров технологических процессов обработки. Так как процесс раз-

рушения согласно экспериментальным данным носит вероятностный характер, определенный интерес при исследовании случайного распределения физико-механических характеристик материалов представляет анализ чувствительности.

**Список литературы:** 1. Аксененко А. В. Работоспособность оболочечных конструкций при локальном ударном нагружении / А. В. Аксененко, В. С. Гудрамович, А. П. Дзюба, А. К. Козлов. – Днепропетровск : ДНУ, 2006. – 216 с. 2. Белов Н. Н. Динамика высокоскоростного удара и сопутствующие физические явления / Н. Н. Белов, Н. Т. Югов, Д. Г. Копаница, А. А. Югов. – Томск: STT, 2005. – 356 с. 3. Прочность, разрушение и диссипативные потери при интенсивных ударно-волновых нагрузках: Сборник научных статей / А. А. Садовыи, С. В. Михайлов. – Саров: ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009. – 420 с. 4. Теоретические и экспериментальные исследования высокоскоростного взаимодействия тел. // Под ред. А. В. Герасимова. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2007. – 572 с. 5. Грабченко А. И. Система моделирования рабочих процессов интегрированных технологий. / А. И. Грабченко, В. Л. Доброскок, С. И. Чернышов // Сучасні технології у машинобудуванні: Збірник наукових статей. – Х.: НТУ «ХПІ», 2007. – С. 236-268. 6. Тимофеев Ю. В. Обобщенная структура жизненного цикла машиностроительного производства и его изделий / Ю. В. Тимофеев, В. А. Фадеев, М. С. Степанов, С. А. Назаренко / Вісник НТУ «ХПІ». – Х.: НТУ «ХПІ», 2009. – Вип. 1. – С. 86-95. 7. Криворучко Д. В. Исследование влияния параметров модели трения на распределение контактных напряжений, силы и температуры резания при механической обработке сталей / Д. В. Криворучко, В. А. Залого, О. А. Залого // Вісник НТУУ «КПІ»: Серія «Машинобудування». – 2009. – № 57. – С. 132-138. 8. Heisel U. Die FEM-Modellierung als moderner Ansatz zur Untersuchung von Zerspanprozessen / U. Heisel, D. V. Kryvoruchko, V. A. Zaloha, M. Storchak, T. Stehle // ZWF. – 2009. – №7-8. – С. 604-616. 9. Кривоцв В. С. Состояние и перспективы применения импульсных источников энергии для технологических процессов обработки материалов / В. С. Кривоцв, В. К. Борисевич // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – № 11 (47). – С. 10-17. 10. Stiener M. Fully-coupled 3D Simulation of Electromagnetic Forming // M. Stiener, J. Unger, H. Blum, B. Svendsen // ICHSF 2006, Dortmund, Germany. – 2006. – P. 63–73. 11. Болюх В. Ф. Мультиполевая модель импульсного электромеханического преобразователя / В. Ф. Болюх, С. А. Назаренко, М. А. Рассоха / Інтегровані технології та енергозбереження. – 2009. – № 3. – С. 34-40. 12. Болюх В. Ф. Системный подход к мультидисциплинарной оптимизации электромеханических преобразователей ударного действия / В. Ф. Болюх, С. А. Назаренко / Інтегровані технології та енергозбереження. – 2010. – № 2. – С. 36-43. 13. Манжосов В. К. Моделирование продольного удара в стержневых системах неоднородной структуры / В. К. Манжосов, В. В. Слепухин. – Ульяновск: УлГТУ, 2011. – 208 с. 14. Meyer L. W. Material behavior under dynamic mono- and biaxial loading / L. W. Meyer, N. Herzig, F. Pursche, S. Abdel-Malek // Proceedings Seventh International Symposium on Impact Engineering, 2010. – Warsaw, Poland, 2010. – P. 472. 15. Колмогоров В. Л. Ударное нагружение и разрушение твердых тел: обзор и новая теория / В. Л. Колмогоров, У. Джонсон, С. Р. Рид, Г. Г. Корбетт. – Екатеринбург: УРО РАН, 2006. – 321 с. 16. Ben-Dor G. Ballistic Impact: Recent Advances in Analytical Modelling of Plate Penetration Dynamics – a Review / G. Ben-Dor, A. Dubinsky, T. E. Iperin // Applied Mechanics Reviews. – November, 2005. – Vol. 58. – P. 355-371. 17. Field J. E. Review of experimental techniques for high rate deformation and shock studies / J. E. Field, S. M. Walley, W. G. Proud, H. T. Goldrein, C. R. Siviour // International Journal of Impact Engineering. – 2004. – № 30. – P. 725-775. 18. Bragov A. M. Tension and compression behaviour of pre-stressed steel strands at high strain rate / A. M. Bragov, E. Cadoni, A. Konstantinov, A. Lomunov // Applied Mechanics and Materials. – 2011. – Vol. 82. – P. 154-159. 19. Леванов А. Н. Контактное трение в процессах обработки давлением / А. Н. Леванов, А. Л. Колмогоров, С. П. Буркин и др. – М.: Металлургия, 1976. – 416 с. 20. ABAQUS User Manual: Version 6.6 / ABAQUS Inc. Pawtucket, Rhode Island, USA, 2006. 21. Eplattenier P. Introduction of an Electromagnetism Module in LS - DYNA for 3D Coupled Mechanical-Thermal-Electromagnetic Simulations / P. Eplattenier, G. Cook, C. Ashcraft // ICHSF 2006, Dortmund, Germany. – 2006. – P. 85–97.

Поступила в редакцию 16.10.2013

**Некоторые задачи высокоскоростного нагружения элементов конструкций / С. А. Назаренко** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 63 (1036). – С. 102-107. – Бібліогр.: 21 назв.

Розглянуто загальні підходи та особливості задач деформування та руйнування елементів конструкцій, сучасних технологій високошвидкісної обробки. Висвітлюються математичні моделі та методи чисельних досліджень високошвидкісного навантаження елементів конструкцій і технологічних систем. Розглянуто перспективи подальших досліджень.

**Ключові слова:** високошвидкісне деформування, руйнування, динамічні властивості матеріалів, пластичні деформації, імпульсні навантаження, оптимізація.

Mathematical model of strain rate deformation of construction elements under impulsive loadings is presented. This model used dynamic properties of materials, finite deformations and three-dimension elastic-plasticity deformations.

**Keywords:** impulsive loadings, train rate deformation, dynamics properties of materials, coupled problem of thermal and stress – strain analysis of structures, plastic deformation.

**В. П. ОЛЬШАНСКИЙ**, д-р. физ.-мат. наук, профессор, ХНТУСХ;  
**С. В. ОЛЬШАНСКИЙ**, канд. физ.-мат. наук, доцент, НТУ «ХПИ»

### **ВБК – МЕТОД В РАСЧЕТАХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ КОЛЕБАНИЙ ОСЦИЛЛЯТОРОВ**

В общем виде представлены приближенные формулы для расчета свободных нестационарных колебаний линейного осциллятора переменных параметров методом ВБК. Проиллюстрировано применение этих формул к решению конкретных задач.

**Ключевые слова:** осциллятор, линейно-переменная длина, ВБК – метод.

**Введение.** Свободные колебания линейного осциллятора монотонно переменных параметров (массы и жесткости) описываются дифференциальными уравнениями с неперiodически переменными коэффициентами. Для отдельных случаев изменения параметров осциллятора аналитические решения этих уравнений удастся выразить через специальные функции. Так при линейном изменении массы во времени уравнения колебаний решены с помощью функций Бесселя в работах [1, 2, 3, 4]. К этим функциям в [5, 6] сведен расчет нестационарных колебаний и при экспонентном изменении массы или коэффициента жесткости пружины осциллятора. Но при более сложных законах изменения параметров точные решения уравнения колебаний обычно